

3. Gambaccini M. et al. Measurement of focal spot size in a 5.5MeV linac // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier B.V.– 2011–Vol. 269–№ 10– Pp. 1157–1165
4. Bavendiek K. et al. New Measurement Methods of Focal Spot Size and Shape of X-ray Tubes in Digital Radiological Applications in Comparison to Current Standards // 18th World Conf. Nondestruct. Test–2012–№ April– Pp. 16–20
5. ISO 17636-2:2013(E) Non-destructive testing of welds — Radiographic testing — Part 2. 2013–Vol. 2013

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БИОИНЕРТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ**

*Шаркеев Ю.П., Вавилов В.П., Скрипняк В.А., Белявская О.А., Козулин А.А., Чулков А.О.,  
Сороколетов А.Ю., Скрипняк В.В.*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности  
и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)  
Томский политехнический университет

### **Введение**

После открытия в начале 50-ых годов прошлого столетия П.-И. Бранемарком (Гетеборг, Швеция) явления остеоинтеграции титан получил широкое распространение в имплантационной хирургии. Лучшей биосовместимостью обладают сплавы, относящиеся к группе «чистого» титана: технически чистый титан отечественных марок ВТ1-0 и ВТ1-00 и зарубежные титановые сплавы Grade-1, 2, 3, 4. Однако невысокий уровень механических свойств чистого титана по сравнению с титановыми сплавами сдерживает его применение в дентальной имплантологии, стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, травматологии и т.п.

Сплавы системы цирконий-ниобий на протяжении полувека используют в качестве материалов для ядерной энергетики. В последнее десятилетие проведено экспериментально-клиническое обоснование возможности их применения в медицинских целях [1].

Для повышения физико-механических свойств титановых и циркониевых сплавов широко применяется интенсивная пластическая деформация (ИПД), позволяющая формировать в зеренной структуре сплавов наноструктурные (НС) или ультрамелкозернистые (УМЗ) состояния [2]. Существенное отличие физико-механических свойств наноструктурированных материалов от обычных поликристаллических материалов связано с особенностями получаемой при этом дефектной структуры, в первую очередь, с большой протяженностью границ зерен и высокой плотностью дислокаций. Комплекс механических свойств УМЗ сплавов и качество получаемой из них продукции существенно зависит от процессов структурирования металлов. В связи с этим исследованию механизмов разрушения НС и УМЗ титана, титановых и других сплавов с помощью структурно-чувствительных методов (внутреннее трение, диссипация энергии и др.) уделяется существенное внимание [3,4].

Высокая чувствительность современных инфракрасных (ИК) тепловизионных систем в сочетании с возможностью бесконтактного оперативного измерения температуры обусловили перспективность метода ИК-термографии для исследования процессов накопления дефектов структуры и развития повреждаемости при механическом нагружении сплавов [5].

Закономерности деформации и разрушения, а также диссипативные эффекты в УМЗ металлах и сплавах в условиях механического нагружения интенсивно исследуются

с применением методов ИК-термографии [6-9]. Максимум интенсивности теплового излучения объектов при температуре окружающей среды лежит в ИК области спектра, что и обусловило целесообразность использования ИК термографии для исследования температурных аномалий, в частности, при деформации и разрушении образцов металлов/сплавов.

В работе исследованы процессы деформирования и разрушения титана BT1-0 и циркониевого сплава Э110 в крупнокристаллическом (КК) и УМЗ структурных состояниях с одновременной регистрацией термографических характеристик деформации и визуализацией температурных полей на поверхности образцов методом ИК-термографии. Цель исследования заключалась в установлении взаимосвязи структурных изменений, характеристик температурных полей и механических свойств материалов.

#### **Объекты и методы исследования**

Для исследования механического поведения сплавов применялись стандартные образцы типа IV для испытаний на растяжение по ГОСТ 25.502-79. Образцы изготавливались фрезерованием из заготовок титана BT1-0 и циркониевого сплава Э110 в виде лент, наноструктурированных комбинированным методом ИПД [10,11]. Для обеспечения размеров и шероховатости поверхности образцы шлифовались шкурками разной зернистости с последующей полировкой алмазной пастой. Для испытаний было отобрано 17 образцов УМЗ титана BT1-0 и 17 образцов УМЗ циркониевого сплава Э110. Напряжения в образцах УМЗ титана снимали отжигом на воздухе при температуре 623 К в течение одного часа, в образцах циркония – отжигом в среде аргона при той же температуре в течение одного часа. Восемь образцов титана были переведены в КК состояние отжигом в среде аргона при температуре 1067 К в течение одного часа, Такое же количество образцов циркония были переведены в КК состояние отжигом в течение 3 часов в вакууме  $10^{-4}$  Па при температуре 853 К.

Механические испытания выполнялись на сервогидравлическом стенде Instron VHS 40/50-20. Схема испытаний показана на рис. 1. Усилия регистрировали с помощью датчика DYNACELL с точностью 0,2%. Одноосное растяжение образцов проводили при растяжении с постоянной скоростью деформации  $0,01 \text{ с}^{-1}$ . На полученных диаграммах «напряжения – деформация» регистрировали следующие характеристики прочности: предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел прочности  $\sigma_b$  и предельная пластическая деформация до разрушения  $\varepsilon_{\max}$ .

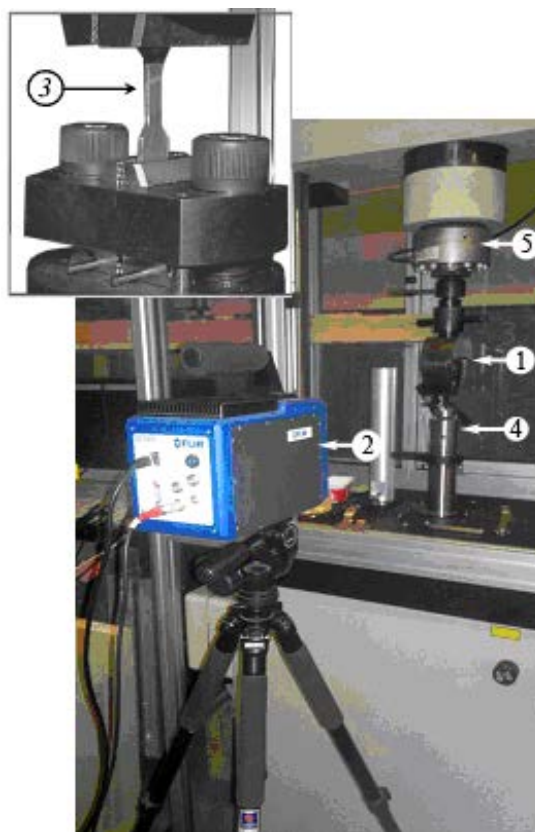


Рис.1. Испытательная машина Instron VHS 40/50-20 и тепловизионная система FLIR SC 7700M: 1 – неподвижный захват испытательной машины; 2 – измерительная тепловизионная системы; 3 – образец, 4 – подвижный захват испытательной машины; 5 – датчик усилий DYNACELL

Изменение температуры на поверхности образцов в процессе их растяжения регистрировали в виде последовательностей ИК термограмм с помощью измерительной тепловизионной системы FLIR SC 7700M, модифицированной для исследования быстропротекающих тепловых процессов. Максимальная частота записи составляла 115 Гц при температурной чувствительности 20 мК и формате изображения 640x512. Тепловизор устанавливали на расстоянии 0,4 м от нагружаемого образца, поле зрения в плоскости образца составляло  $17,3 \times 13,8$  см при размере пикселя 0,27 мм.

Программное обеспечение системы ИК контроля включало программу цифровой записи в режиме «on-line» на стандартный персональный компьютер, а также специализированную программу Altair для обработки температурной информации в режиме «off-line». Перед проведением эксперимента с целью уменьшения помех, связанных с отражением от поверхности исследуемых образцов, поверхности чернили сажей, обеспечивающей состояние поверхности, близкое к «абсолютно черным телом». На рис. 2 показан образец с нанесенным слоем сажи.



Рис.2. Образец с зачерненной поверхностью

После испытаний образцов были проведены фрактографические исследования поверхностей их разрушения методом электронной растровой микроскопии (РЭМ) на микроскопе LEO EVO 50 в ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН (ЦКП ТНЦ СО РАН). Подготовка образцов для исследования с помощью РЭМ заключалась в очистке растворителями в ультразвуковой ванне [12].

В процессе испытания регистрировалось время деформации  $t$  (с), величина перемещения нижнего захвата испытательной машины  $d$  (мм), скорость растяжения и деформирующее усилие  $N$  (кН). Условное напряжение и относительная продольная деформация ( $\epsilon$ ) определялись в соответствии с ГОСТ 25.502-79 по формулам

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} 100\%, \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{N}{S_0} (1 + \epsilon), \quad (2)$$

$$S_0 = (a_0 b_0) / (1 + \epsilon), \quad (3)$$

где  $N$  – деформирующее усилие,  $\sigma$  – условное напряжение,  $S_0$  – площадь поперечного сечения образца,  $a_0$  – начальная толщина образца,  $b_0$  – начальная ширина образца.

Для определения удлинения образца  $\Delta l$  в ходе процесса растяжения использовались следующие формулы:

$$\Delta l = l - l_0, \quad (4)$$

$$l = l_0 + d, \quad (5)$$

где  $l_0$  – начальная длина рабочей части образца,  $l$  – длина образца,  $d$  – перемещение нижнего захвата испытательной машины.

Тепловизионная система позволила зарегистрировать не только распределение температуры на поверхности образцов, но и текущую конфигурацию образцов в процессе деформации. Используя изображения образца в начальный момент времени и в последующие моменты кадровой регистрации, были определены поперечные сечения рабочей части образца. Полученные значения были использованы для определения истинных напряжений. Измерение ширины образца  $a$  в области «шейки», проводилось с помощью программы PhotoM 1.21. Обработка покадровой регистрации процесса деформации было выполнено средствами программного комплекса Altair.

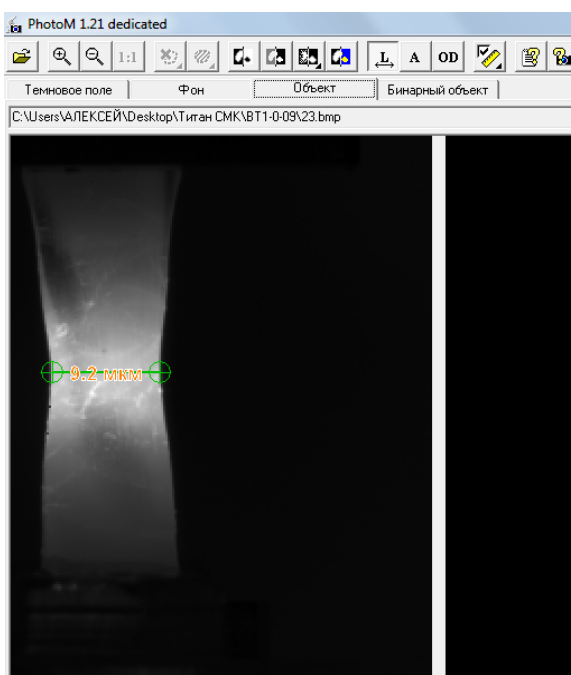


Рис.3. Измерение ширины образца в «шейке» с помощью программы PhotoM 1.21

Для определения истинных напряжений были выбраны 30 кадров из совокупности кадров тепловизионной съемки всего процесса растяжения образцов. Первое изображение соответствовало началу процесса растяжения в момент времени  $t_0$ . По изображению образца в момент времени  $t_0$  выполнялась калибровка для определения ширины образцов в последующие моменты времени. Истинные напряжения при формировании «шейки» вычислялись по формулам:

$$\sigma = \frac{N}{S}, \quad (6)$$

$$S = a b, \quad (7)$$

$$b = b_0 (a / a_0), \quad (8)$$

где  $a$  – ширина образца в области «шейки»,  $b$  – толщина образца в области «шейки»,  $S$  – площадь поперечного сечения в «шейке» образца.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты испытания всех образцов сплавов BT1-0 и Э110 в УМЗ и КК состояниях на растяжение показаны в табл. 1. В случае КК состояния максимальные напряжения течения для исследуемых сплавов практически одинаковы. В то же время образцы сплава Э110 имеют значительно более высокую предельную пластичность. УМЗ структура обеспечивает более высокие максимальные напряжения для сплава BT1-0 по

сравнению со сплавом Э110, а величины максимальной деформации до разрушения в этом структурном состоянии для исследуемых сплавов совпадают.

Таблица 1. Результаты испытания образцов сплавов ВТ1-0 и Э110 на растяжение

ВТ1-0, КК № образца	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация до разрушения, %	ВТ1-0, УМЗ № образца	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация до разрушения, %
1	587±2	33	9	1007±2	24
2	600±2	36	10	1032±2	20
3	574±2	33	11	1017±2	17
4	588±2	37	12	1020±2	25
5	575±2	31	13	1018±2	23
6	536±2	29	14	1079±2	21
7	584±2	39	15	1081±2	22
8	581±2	38	16	1075±2	21
			17	952±2	22
	Среднее значение 580±2	Среднее значение 34±0,5		Среднее значение 1030±2	Среднее значение 22±0,5
Э110, КК № образца	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация до разрушения, %	Э110, УМЗ № образца	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация до разрушения, %
19	568±2	54	26	794±2	24
20	585±2	52	27	771±2	20
21	552±2	49	28	771±2	19
22	535±2	43	29	810±2	24
23	540±2	44	30	751±2	23
24	559±2	49	31	830±2	22
25	487±2	37	32	843±2	21
			33	841±2	21
			34	759±2	24
	Среднее значение 546±2	Среднее значение 47±0,5		Среднее значение 796±2	Среднее значение 22±0,5

На рис. 4–7 приведены примеры диаграмм «напряжение-деформация» образцов титана ВТ1-0 и циркония Э110 с КК и УМЗ структурой для условного напряжения (кривые 2) и для истинного напряжения (кривые 1), рассчитанного с учетом образования «шейки» на образцах. Видно, что диаграммы «условное напряжение- относительная деформация» имеют стандартный вид. Кривые течения имеют восходящую параболическую ветвь, которая переходит в ниспадающую часть с отрицательным коэффициентом деформационного упрочнения. В случае диаграмм растяжения «истинное напряжение- относительная деформация» ситуация несколько иная. В области активного образования «шейки» имеет место значительный рост истинного напряжения течения с высоким коэффициентом деформационного упрочнения.

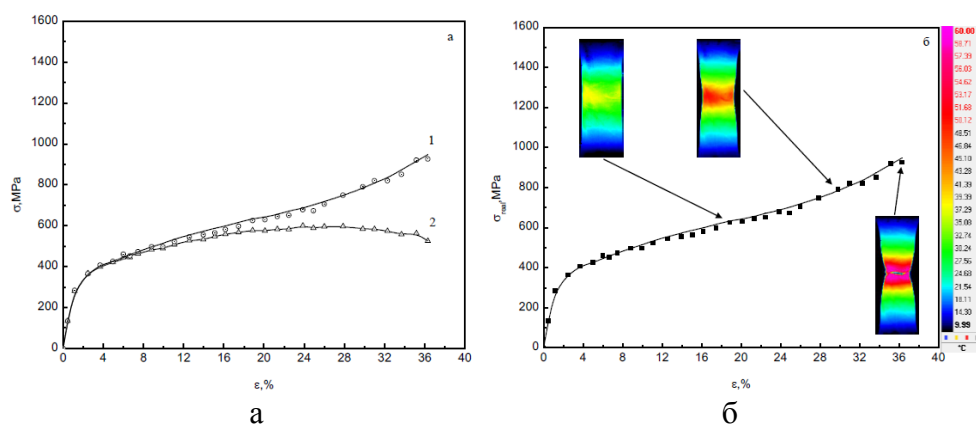


Рис.4. Диаграмма «истинное напряжение-относительная деформация» – 1, диаграмма «условное напряжение – относительная деформация» – 2 образца № 2 титанового сплава BT1-0, КК – а, диаграмма «истинное напряжение — относительная деформация» с указанием наибольшей температуры в рабочей части образца – б

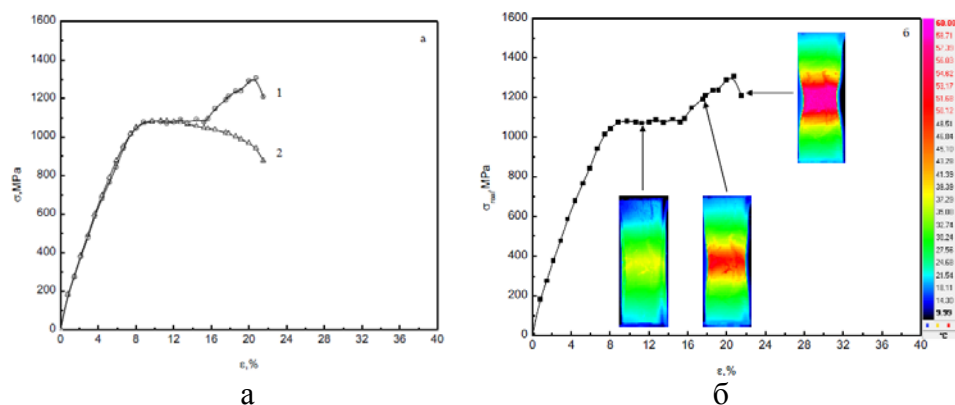


Рис.5. Диаграмма «истинное напряжение-относительная деформация» – 1, диаграмма «условное напряжение-относительная деформация» – 2 образца № 14 титанового сплава BT1-0, УМЗ – а, диаграмма «истинное напряжение — относительная деформация» с указанием наибольшей температуры в рабочей части образца – б

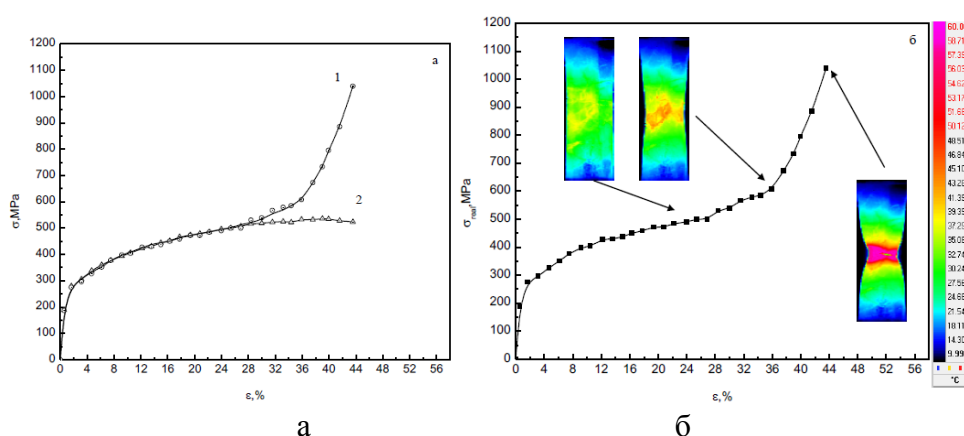


Рис.6. Диаграмма «истинное напряжение-относительная деформация» – 1, диаграмма «условное напряжение-относительная деформация» – 2 образца № 22 циркониевого сплава Э110, КК – а, диаграмма «истинное напряжение — относительная деформация» с указанием наибольшей температуры в рабочей части образца – б

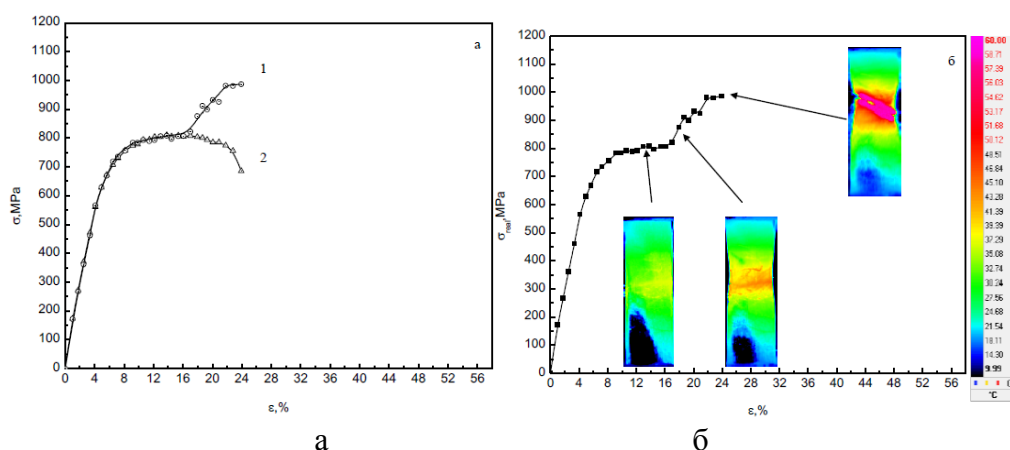


Рис.7. Диаграмма «истинное напряжение-относительная деформация» – 1, диаграмма «условное напряжение - относительная деформация» – 2 образца № 29 циркониевого сплава Э110, УМЗ – а, диаграмма «истинное напряжение — относительная деформация» с указанием наибольшей температуры в рабочей части образца – б

Наиболее ярко это проявляется для сплавов в УМЗ состоянии. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными для высокоскоростной деформации титановых сплавов [13,14].

При рассмотрении термографических кривых (таблица 2) выявлено отличие для образцов сплавов в КК структурном состоянии по сравнению с образцами, имеющими УМЗ структуру. Для титана ВТ1-0 в КК состоянии типична следующая зависимость: максимальная температура на поверхности деформируемого образца линейно повышается с ростом степени деформации до определенного значения (в интервале 50–55°C), а затем происходит скачкообразное повышение максимальной температуры на 5–10°C (до температуры 58,45–60,54°C) в связи с развитием локализации пластической деформации. Для титана ВТ1-0 в УМЗ состоянии типична несколько другая зависимость: максимальная температура образца увеличивается линейно с ростом степени деформации в интервале 50–58°C, затем температура не меняется.

Наименьшие значения напряжения течения и удлинения при растяжении среди образцов титана в КК состоянии имел образец №6, у которого скачкообразное повышение максимальной температуры началось с 50°C.

Для образцов титана ВТ1-0 в УМЗ состоянии наименьшие значения напряжения течения и удлинения имели образцы №17 (по максимальному напряжению течения) и №11 (по величине деформации). Исследования поверхности разрушения у этих образцов в РЭМ показали наличие цепочек микропор (рис. 8, 9).

Термографические кривые (табл. 2) для этих образцов также имеют отличия от характерных кривых для соответствующей группы. У образца №11 повышение максимальной температуры начинается с минимального значения (50°C), а «плато» (постоянная температура в течение определенного времени) имеет минимальную протяженность, у образца №17 «плато» имеет не горизонтальную форму, а «ступенькой».

Для циркония в КК состоянии график изменения максимальной температуры образца в процессе деформации и разрушения отличается от графиков для титана в КК состоянии более медленным ростом максимальной температуры (примерно в 1,5 раза). Типичным является линейное повышение температуры до определенного значения в интервале 38 – 46°C, затем скачкообразное повышение до максимальной температуры (58,04 – 58,80°C). У циркония в УМЗ состоянии зависимость максимальной температуры в процессе деформации и разрушения также отличается от зависимостей для УМЗ состояния титана отсутствием «плато», зависимость имеет другую форму: почти линейное



повышение температуры до определенного значения в интервале 40-68°C, затем резкое снижение температуры.

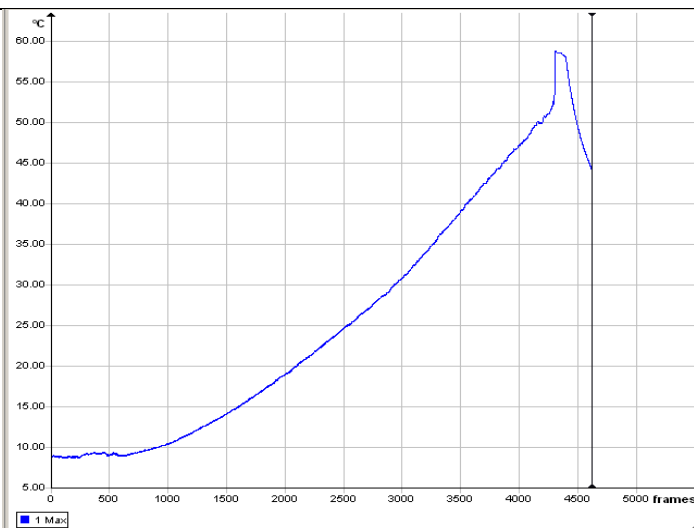
Для образцов циркония в КК состоянии, имеющих по максимальному напряжению течения «лучший» (образец №20) и «худший» (образец №25) результаты, термографические графики имеют следующие отличия. У образца №20 скачкообразное повышение температуры начинается с 42°C, а у образца №25 – с 38°C. Максимальные температуры, зафиксированные при деформации, у образца №20 соответствует значению 58,80°C, а у образца №25 – 58,04°C.

Для образцов циркония в УМЗ состоянии, имеющих «худшие» значения по максимальному напряжению течения (образец №30 и №34), рост температуры наблюдается с минимальных из имеющих место в группе значений (52°C и 50°C соответственно) соответственно. Для образца №28, отличающегося «худшим» результатом по значению деформации (18,6%), рост температуры наблюдается с еще более низкого значения – 40°C. Для образцов, имеющих лучшие значения максимального напряжения (образцы №32 и №33), рост температуры происходит с максимального значения в этой группе образцов (68°C). Других особенностей на термографических кривых не удалось идентифицировать. Можно предположить, что это связано с несовершенством процесса интенсивной пластической деформации при подготовке образцов циркония в УМЗ состоянии [15]. Предположение основано на результатах РЭМ исследования поверхности разрушения образцов (рис. 10), которые подтверждают неоднородность структуры циркония в УМЗ состоянии от периферии образца к центру.

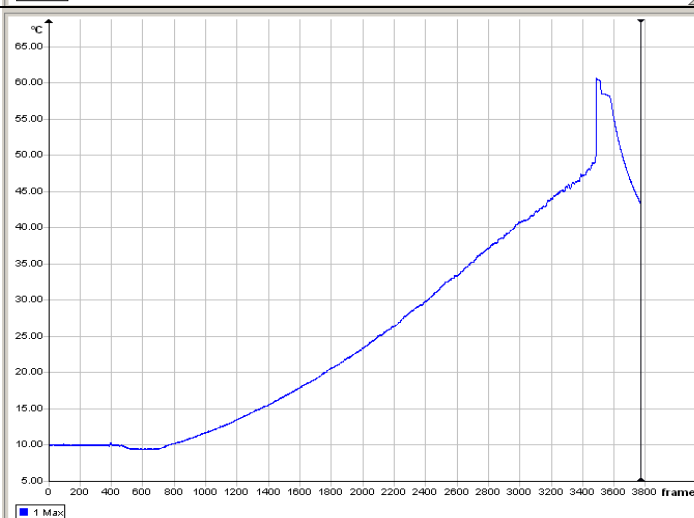
Таблица 2. ИК-термограммы исследуемых образцов

Обозначение образца, материал образца, структурное состояние	Графическое отображение максимальной температуры образца в процессе деформации и разрушения
2 (ВТ1-0, КК)	

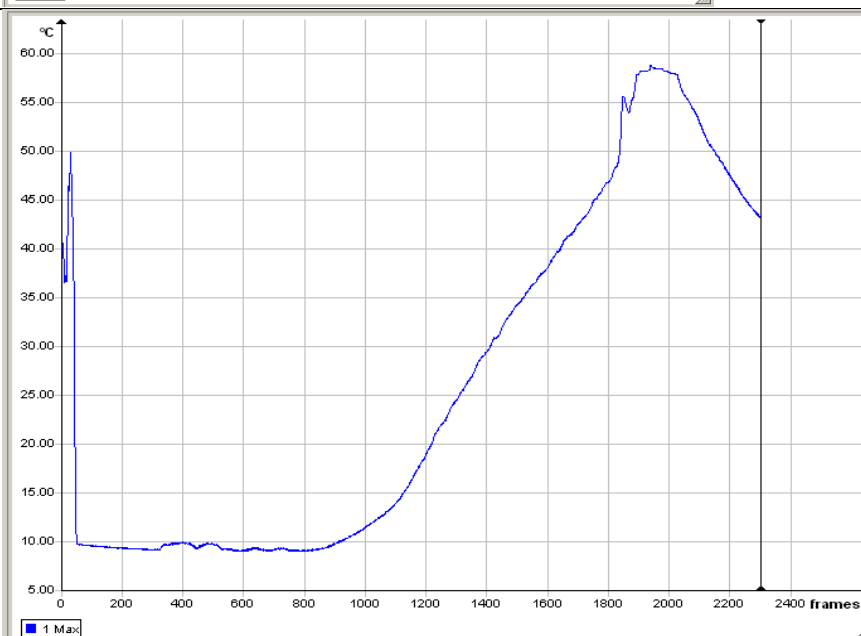
4 (BT1-0, KK)



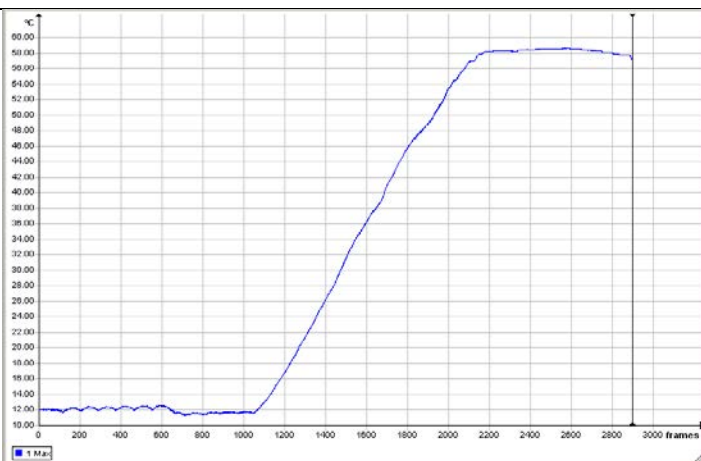
6 (BT1-0, KK)



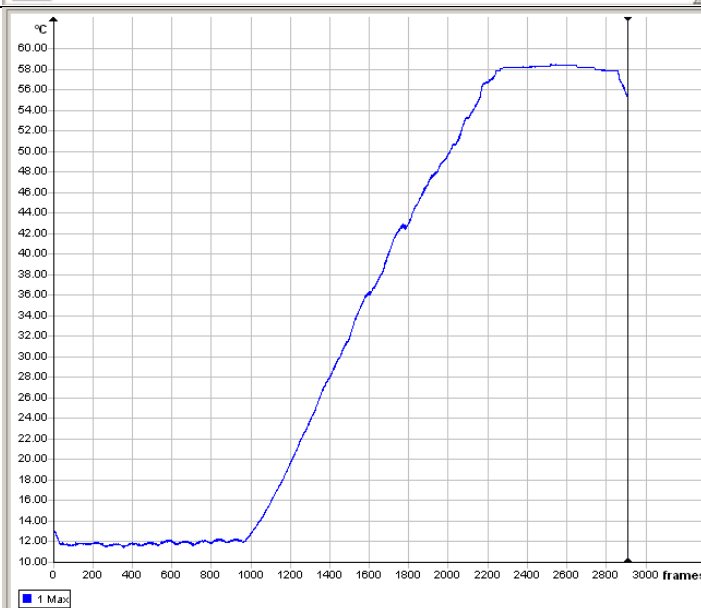
11 (BT1-0, YM3)



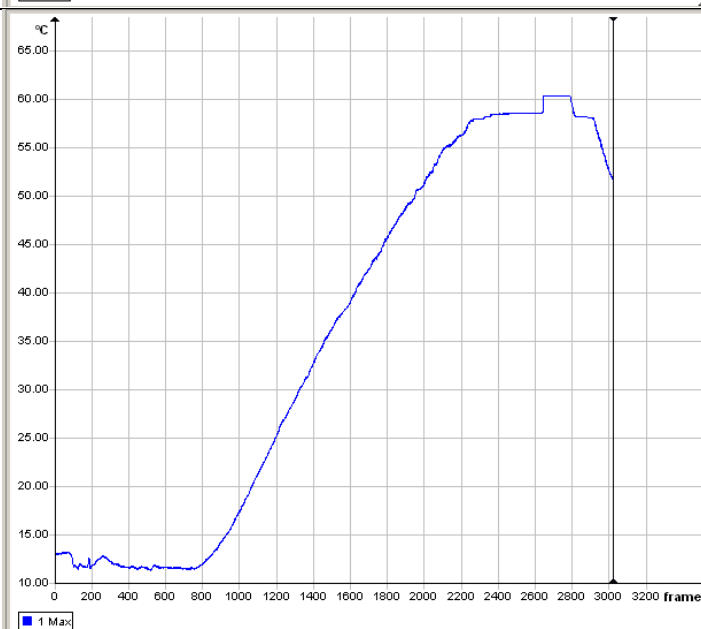
14 (BT1-0, YM3)



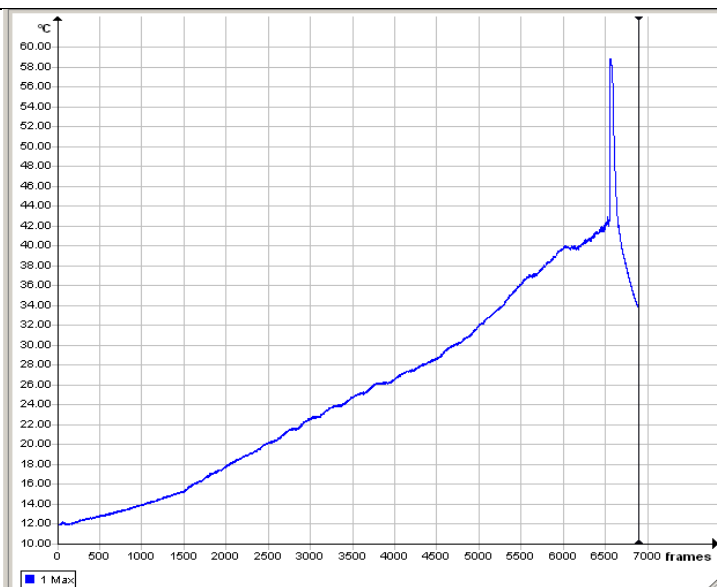
15 (BT1-0, YM3)



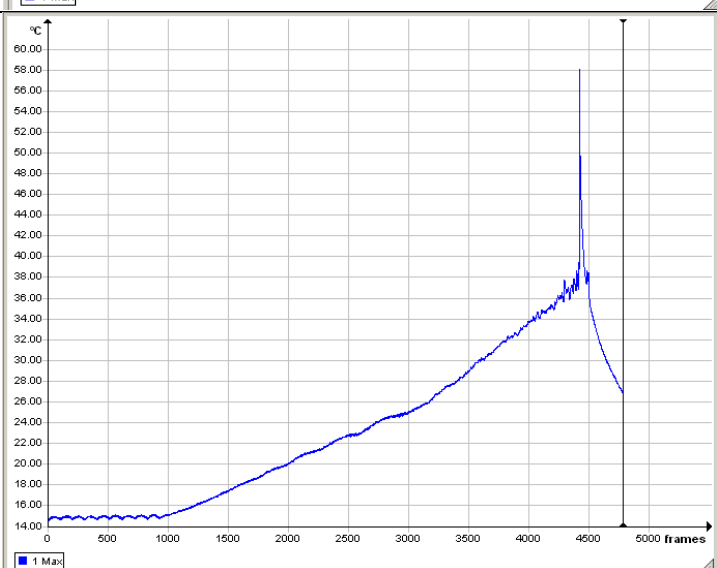
17 (BT1-0, YM3)



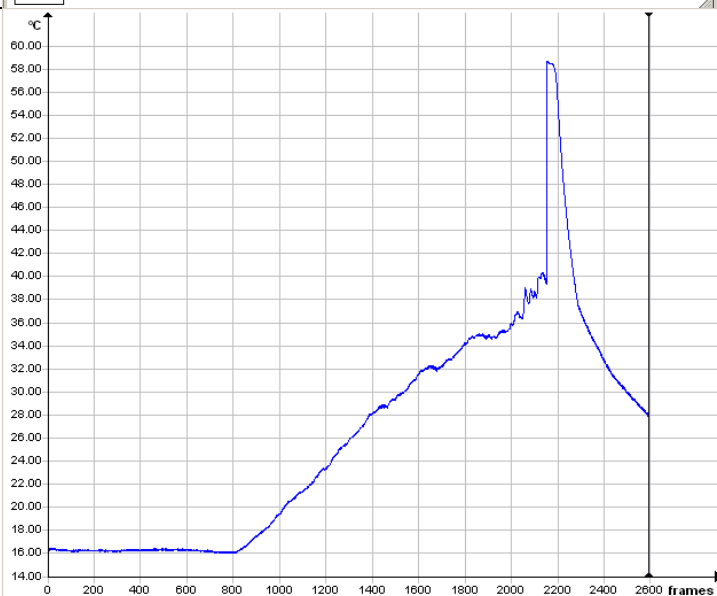
20 (Э110, КК)

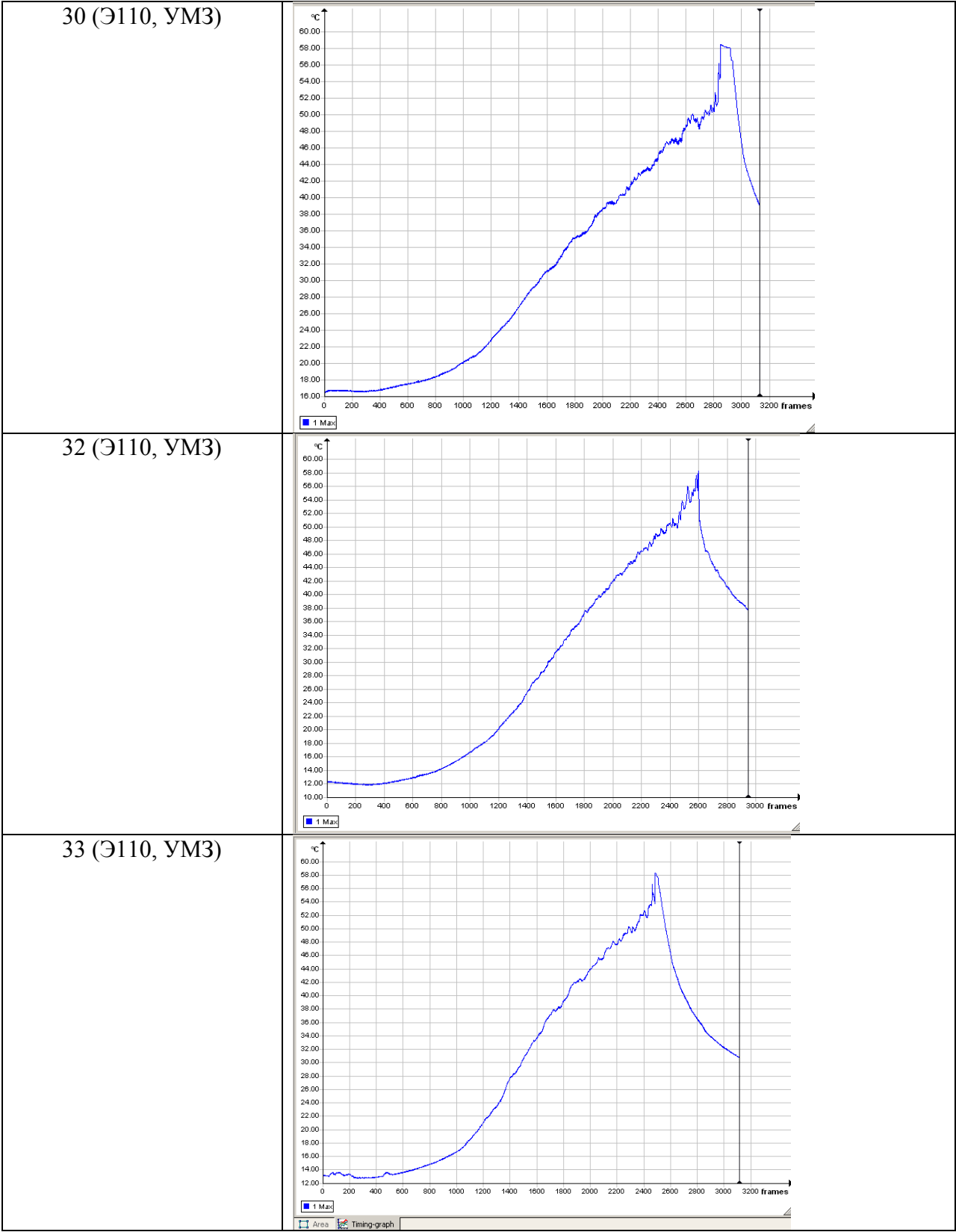


25 (Э110, КК)



28 (Э110, УМ3)





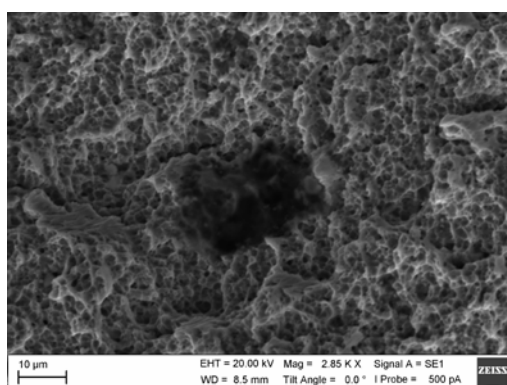
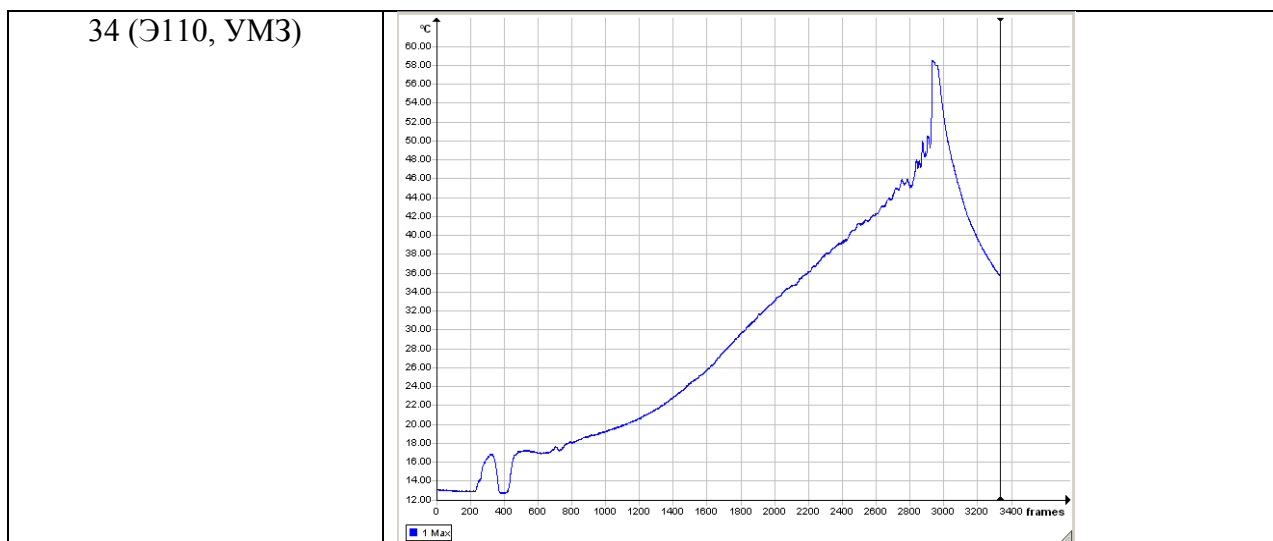


Рис.8. РЭМ изображение поверхности разрушения образца 11

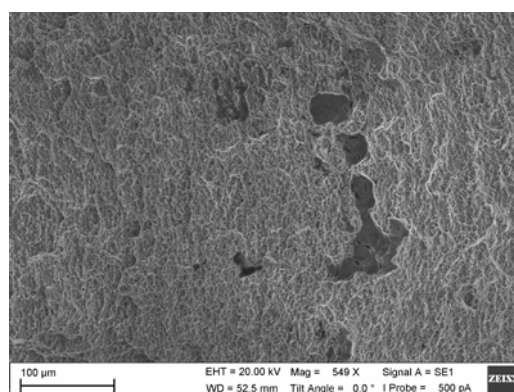
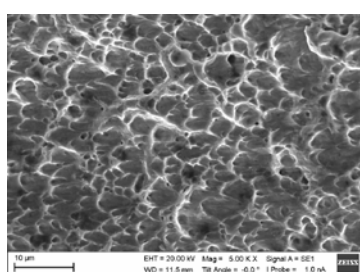
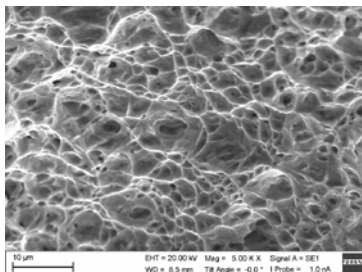


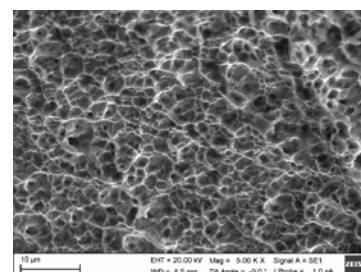
Рис.9. РЭМ-изображение поверхности разрушения образца 17



а



б



в

Рис.10. РЭМ – изображения поверхности разрушения образца 30 в разных точках по толщине образца: а, в – в крайних точках, б – в средней точке.

### Заключение

1. Пределы прочности УМЗ титана BT1-0 и циркониевого сплава Э110 при испытании на растяжение с постоянной скоростью деформации  $0,01 \text{ с}^{-1}$  выше, чем у сплавов в КК состояниях на 78 % и 46 % соответственно.
2. УМЗ титановый сплав BT1-0 при растяжении с постоянной скоростью деформации  $0,01 \text{ с}^{-1}$  обладает меньшей величиной предельной деформации до разрушения по сравнению со значением для сплава в КК состоянии в 1,7 раза, а УМЗ циркониевый сплав Э110 - в 2,2 раза.
3. Инфракрасные термограммы свидетельствуют о формировании неоднородного поля температуры в рабочей части деформируемых плоских образцов, обусловленного

развитием локализации пластического течения. Наибольшее повышение температуры имеет место в областях, прилегающих к границам магистральной трещины.

4. ИК термографическая визуализация температурных полей, возникающих на поверхности образцов в процессе деформирования до разрушения при растяжении, позволяет различать структурные состояния различать по типу термограммы.

5. Отклонения от типичной структуры сплавов титана и циркония в КК и УМЗ состояниях вызывает ухудшение механических свойств (напряжение течения, предельная деформация до разрушения), характерных для определенного структурного состояния, и вносят изменения в типичные для каждого состояния ИК термограммы процессов деформации и разрушения.

6. Полученные данные могут быть использованы при разработке методов неразрушающего контроля и идентификации структуры титановых и циркониевых сплавов, а также прочностных свойств технических и медицинских изделий из них.

*Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН III.23.2, 2013-2016 гг.*

#### **Список использованных источников**

1. Пилипенко Н.Н., Дробышевская А.А., Ажажа Р.В. и др. Материалы на основе циркония для создания медицинских имплантатов//Journal of Kharkiv National University–№3–2013–С. 105–109
2. Колесников А. Г., Шинкарев А. С. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов // Наука и Образование – 2014–№ 11–С. 34–44
3. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Семенова И.П. и др. Динамические свойства и механизмы разрушения наноструктурированных титана и титанового сплава для изготовления медицинских изделий // Вестник Новгородского государственного университета – 2012 – №67 – С. 19–23
4. Гундеров Д.В., Поляков А.В., Ситдилов В.Д. и др. Внутреннее трение и эволюция ультрамелкозернистой структуры при отжиге титана Grade 4, подвергнутого интенсивной пластической деформации // Физика металлов и металловедение – 2015 – Т. 114 – №12 – С.1136–1143
5. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль – М.: Спектр – 2009 – 544 с.
6. Плехов О.А., Уваров С.В., Сантье Н. и др. Исследование усталостного деформирования материалов с использованием метода инфракрасной термографии//Деформация и разрушение материалов – 2005 – №11 – С. 39–43
7. Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В., Леонтьев В.А. и др. Структурно-скейлинговые переходы и некоторые термодинамические и кинетические эффекты в материалах в объемном субмикро- (нано-)кристаллическом состоянии//Физическая мезомеханика – 2009 – Т.12–№ 4–С. 47–59
8. Изюмова А.Ю. Разработка методов регистрации и анализа динамики источников тепла, вызванных эволюцией структуры механических и биологических систем /Автореферат на соиск. уч. ст. к.ф.-м. н. Пермь. 2014
9. Белявская О.А., Шаркеев Ю.П., Вавилов В.П. и др. Исследование процесса деформации и разрушения титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях методом инфракрасной термографии//Контроль. Диагностика – 2013 – №13 – С. 275–280
10. Шаркеев Ю.П., Псахье С.Г. и др. Биоконкомпозиты на основе кальцийфосфатных покрытий, наноструктурных и ультрамелкозернистых биоинертных металлов, их биосовместимость и биodeградация / отв. ред. Н.З. Ляхов. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета – 2014 – 596 с.

11. Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Данилов В.И. и др. Микроструктура и механические свойства наноструктурированных и ультрамелкозернистых титана и циркония, сформированных методом интенсивной пластической деформации//Изв. Высш. Учеб. заведений. Физика – 2013 – Т. 56 – №10 – С. 47–53
12. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля – М.: Техносфера – 2006 – 384 с.
13. Skripnyak V.A. Mechanical behavior of nanostructured and ultrafine-grained materials under shock wave loadings. Experimental data and results of computer simulation//Proc. Shock Compression of Condensed Matter. AIP Conf. Proc. – 2012 – V. 1426 –P. 965 –970
14. Herzig N., Meyer L.W., Musch D., et al. Modeling of Mechanical behavior of ultra-fine grained titanium alloys at high strain rates // Proc. 3-rd Int. Conf. on High Speed Forming. March 11-12, Dortmund, Germany – 2008 — 14 p.
15. Данилов В.И., Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П. и др. Особенности деформации и разрушения ультрамелкозернистых сплавов на основе титана и циркония//Физическая мезомеханика – 2014 – Т.17 – №4 – С. 77–85

## **МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ БЕЗУДАРНОМ ПУСКЕ**

*Паюк Л.А., Гальцева О.В., Воронина Н.А.*  
Томский политехнический университет, г. Томск

Современная концепция расчета и проектирования электроприводов колебательного движения (ЭПКД) опирается на принципы энергетической и ресурсоэффективности, что находит своё отражение в методиках их анализа и синтеза. ЭПКД широко применяется в современной промышленности: от вибрационных систем проверки электрооборудования до систем вентиляции легких и жизнеобеспечения человека [1–4]. Колебания измеряются от нескольких микрон до метра [1, 5]. И в том и в другом случае, необходимо учитывать особенности данных ЭПКД (несинусоидальность питающего напряжения, гармонический состав токов в обмотках статора и ротора исполнительного двигателя, наличие двойной частоты в электромагнитном моменте).

Исходя из вышесказанного, общепринятые критерии эффективности электроприводов для данного вида электропривода не пригодны, так как не учитывают их специфику. Поэтому предлагается использовать методику оценки энергетических характеристик управляемого ЭПКД на базе серийного асинхронного двигателя, включённого по схеме машины двойного питания (МДП), колебательный режим в котором возбуждается с помощью периодического мягкого реверса [6]. Отличительной особенностью данной методики является учет гармонического состава питающего напряжения и, как следствие, результирующего электромагнитного момента, угловой скорости вращения и закона движения подвижного элемента приводного двигателя с учетом наличия искажения и несимметрии.

Известно, что наибольшее потребление мощности при работе любого электропривода происходит при его пуске за счёт возникновения пусковых токов и момента, которые могут отличаться от номинальных значений в несколько раз. Поэтому нами был предложен способ обеспечения безударного пуска ЭПКД с МДП по току и моменту. Согласно [7, 8] коррекция фаз питающих напряжений позволяет уменьшить величину ударного значения тока статора на 30 %, а электромагнитного момента – в 3,01 раза.

Выражения для пусковых токов и момента здесь приводить не будем, отметим лишь условия безударного пуска по току и моменту, исходя из условия [1] (табл. 1).